

УДК 621.313:536.2.24:539.2

**Болюх В. Ф.**, д-р техн. наук,  
**Олексенко С. В.**,  
**Щукин И. С.**, канд. техн. наук

## ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

**Аннотация.** Рассмотрена технология экспериментальных исследований линейных электромеханических преобразователей ударного действия, работающих в качестве ускорителя и ударно-силового устройства. При исследованиях одновременно регистрируются быстро протекающие электрические и механические процессы в электромеханических преобразователях. Для измерения механических процессов в ударно-силовом устройстве используется пьезоэлектрический датчик, а в ускорителе – резистивный датчик перемещений.

**Ключевые слова:** электромеханические преобразователи, ударное действие, экспериментальные исследования, электрические процессы, механические процессы.

**Болюх В. Ф.**, д-р техн. наук,  
**Олексенко С. В.**,  
**Щукін І. С.**, канд. техн. наук

## ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ УДАРНОЇ ДІЇ

**Анотація.** Розглянута технологія експериментальних досліджень лінійних електромеханічних перетворювачів ударної дії, що працюють в якості прискорювача та ударно-силового пристрою. При дослідженнях одночасно реєструються швидко плинні електричні та механічні процеси в електромеханічних перетворювачах. Для вимірювання механічних процесів в ударно-силовому пристрої використовується п'єзоелектричний датчик, а в прискорювачі – резистивний датчик переміщення.

**Ключові слова:** електромеханічні перетворювачі, ударна дія, експериментальні дослідження, електричні процеси, механічні процеси.

**Bolyukh V. F.**, Sc.D.,  
**Oleksenko S.V.**,  
**Shchukin I. S.**, Ph.D.

## FEATURES OF THE EXPERIMENTAL STUDY OF LINEAR ELECTROMECHANICAL CONVERTER OF IMPACT ACTION

**Abstract.** The technology of experimental studies of linear electromechanical impact converters working as an accelerator and shock-power devices considered. In studies of simultaneously recorded rapidly occurring electrical and mechanical processes in electromechanical converters. To measure the mechanical processes in the shock-power device uses a piezoelectric sensor and resistive displacement sensor is used in an accelerator.

**Keywords:** electromechanical converter, the shock effect, experimental study, electric processes, mechanical processes.

**Введение.** Линейные электромеханические преобразователи ударного действия (ЛЭПУД) предназначены или для ускорения исполнительного элемента (ИЭ) на коротком активном участке, или для создания силовых импульсов при незначительном перемещении ИЭ [1]. Эти преобразователи используются во многих отраслях науки и техники в качестве электромеханических ускорителей и ударно-силовых устройств [2-4]. ЛЭПУД индукционного типа обеспечивает бескон-

тактное перемещение электропроводящего якоря относительно неподвижного индуктора, возбуждаемого от импульсного источника, например, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) с электронной системой формирования токового импульса [5]. В нем возникают быстропротекающие электромагнитные, тепловые, механические и газодинамические процессы, которые проявляются при перемещении якоря в условиях окружающей среды. Математические модели ЛЭПУД реа-

лизуется, как правило, с использованием методов расчета электрических цепей и конечных элементов [6, 7]. При этом возникает вопрос о верификации расчетных параметров экспериментальными методами. Поскольку рабочий цикл рассматриваемых преобразователей длится порядка мс с быстрым перемещением якоря, то это накладывает особенности на проведение экспериментальных исследований [8]. Применение сверхскоростной специальной регистрирующей аппаратуры при этом не всегда оправдано.

### Постановка задач исследования

Целью статьи является разработка технологии экспериментальных исследований, которая учитывает и электрические, и механические процессы ЛЭПУД.

При работе ЛЭПУД в качестве ускорителя необходимо контролировать перемещение якоря, а при работе в качестве ударно-силового устройства – величину силового воздействия на соответствующий объект.

Рассмотрим ЛЭПУД индукционного типа, который состоит из неподвижного индуктора с многovitковой обмоткой и подвижного массивного якоря. Параметры индуктора [4]: внешний диаметр  $D_{ex1}=100$  мм, внутренний диаметр  $D_{in1}=10$  мм, высота  $H_1=10$  мм, количество витков  $N_1=46$  шт. Сечение медной шины  $a \times b=1,8 \times 4,8$  мм<sup>2</sup>. Якорь выполнен в виде медного диска с размерами: внешний диаметр  $D_{ex2}=100$  мм, внутренний диаметр  $D_{in2}=10$  мм, высота  $H_2=3$  мм. К якору присоединен ИЭ массой  $m_e=0,275$  кг. Индуктор возбуждается от ЕНЭ апериодическим однополярным импульсом (индуктор шунтирован обратным диодом). ЕНЭ, выполненный на базе электролитических конденсаторов НЖ, имеет емкость  $C=2850$  мкФ и напряжение  $U_0$  до 400 В.

С использованием расчетной методики [4] были получены электромеханические характеристики ЛЭПУД. На рис.1 представлены: плотность тока в индукторе  $j_1$ , усредненная по сечению плотность тока в якоре  $j_2$ , величина  $f_z$  и импульс  $F_z = \int f_z(z,t)dt$  электродинамической силы, которая действует на якорь, перемещаемый на расстояние  $z$  относительно индуктора со скоростью  $v_z$ . Через  $t=1,4$  мс после начала рабочего процесса ток

в якоре меняет полярность, что обуславливает следующий характер силового воздействия: начальное отталкивание сменяется последующим притяжением.

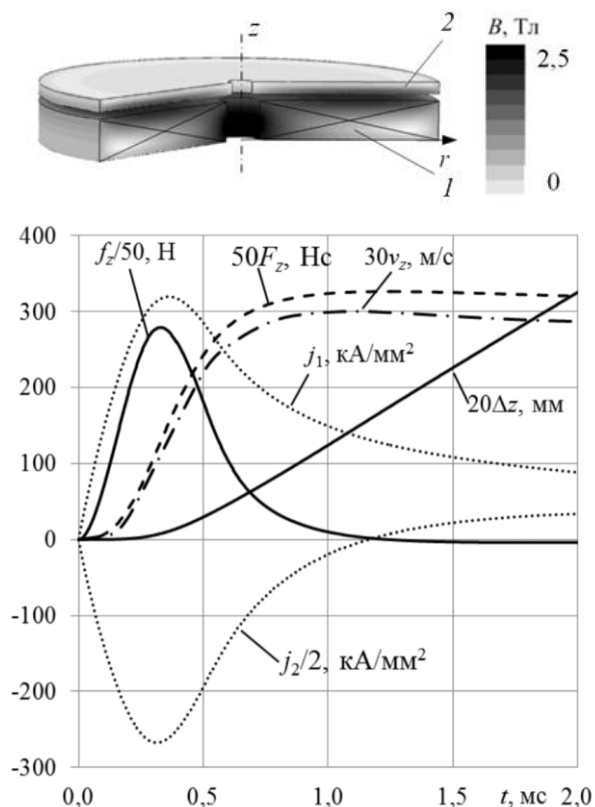


Рис. 1. Распределение магнитного поля в момент максимума силы (а) и электромеханические характеристики ЛЭПУД: 1 - индуктор; 2 - якорь

**Ударно-силовое устройство.** Для экспериментальных исследований ЛЭПУД в качестве ударно-силового устройства была разработана установка, включающая индуктор 1 с обмоткой возбуждения в стеклотекстолитовом каркасе, который прикреплен к опорной пластине 2 (рис.2).

К якору 3 присоединен ударный стальной ударный диск 4, который воздействует на вертикально установленный боек 5, совершающий удары по верхней стальной плите 6. Опорная пластина 2 прикреплена к нижней стальной плите 7. Плиты 6 и 7 соединены между собой посредством регулируемых опор 8, что позволяет изменять величину рабочего хода бойка  $Z_e$ . Пружины 9 обеспечивают заданную силу противодействия движению. На плите 6, ограничивающей рабочий ход бойка 5, сверху установлен пьезоэлектрический датчик 10, который

осуществляет преобразование механических колебаний, возникающих при ударе бойка, в электрические сигналы, передавая их на измеритель шума и вибрации ВШВ-003. Последний преобразует электрические сигналы в величины виброускорения  $a_f$  и виброскорости  $v_f$ . Экспериментальная установка позволяет одновременно измерять ток в индукторе и вибрацию плиты 6 при помощи двухканального электронного осциллографа *RIGOL DS 522M*.

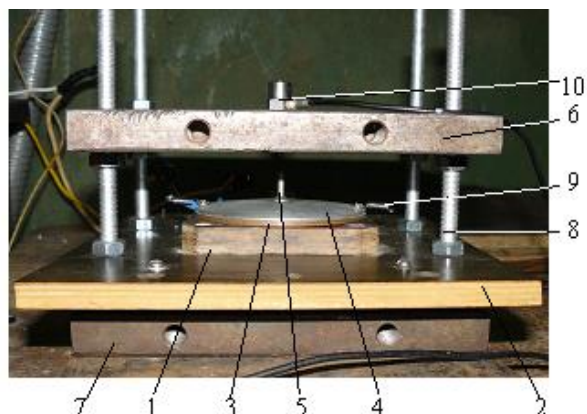


Рис.2. Установка для исследований ЛЭПУД, работающего в качестве ударно-силового устройства

На рис.3 представлены осциллограммы тока в индукторе  $i_1$  и виброускорения  $a_f$  при различной величине рабочего хода якоря  $Z_e$ .

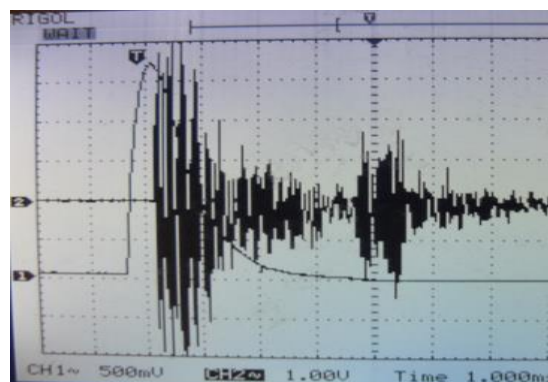
Вибрации возникают в верхней плите с некоторым запаздыванием  $t_0$  по отношению к моменту возникновения тока в индукторе даже при отсутствии хода якоря. При увеличении величины рабочего хода  $Z_e$  возрастает и запаздывание  $t_z$ . При заданном расстоянии от бойка до пластины вычисляется средняя скорость на участке движения:

$$V_{cp} = Z_e(t_z - t_0)^{-1}.$$

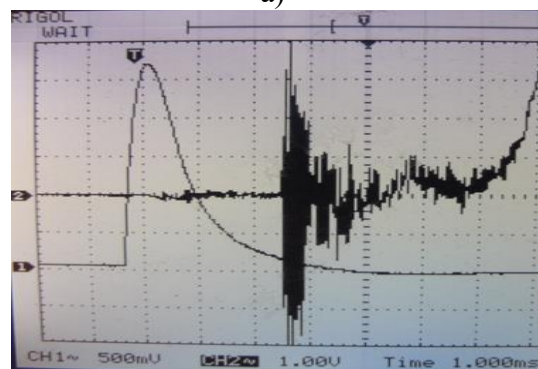
На основе экспериментальных исследований определяются:

- форма и амплитудное значение тока индуктора  $i_{1m}$ ;
- длительность фронта импульса тока  $t_{фр}$ ;
- длительность импульса тока  $t_{имп}$ ;
- средняя скорость якоря  $V_{cp}$ ;
- величина виброускорения  $a_f(t)$ , пропорциональная мгновенной силе  $f_z(z, t)$ ;

- величина виброскорости  $v_f(t)$ , пропорциональная импульсу силы  $F_z$ .



а)



б)

Рис.3. Осциллограммы тока в индукторе (канал CH1) и виброускорения (канал CH2) при величине  $Z_e$ : 0 мм (а); 10 мм (б)

Измеренные значения средней скорости якоря с ИЭ  $V_{cp}$  при различной величине рабочего хода якоря  $Z_e$  на 8 – 15 % меньше расчетных, что можно объяснить неучетом всех противодействующих и тормозных сил. Аналогичные зависимости проявляются между расчетными и экспериментальными значениями импульса силы  $F_z$  (рис.4).

Таким образом, наибольшие значения импульса силы  $F_z$  возникают при заторможенном якоре, затем они снижаются практически линейно с увеличением рабочего хода  $Z_e$ .

### Электромеханический ускоритель.

Для исследования ЛЭПУД, работающего в качестве ускорителя, была разработана установка, представленная на рис.5.

Индуктор 1 ЛИДП состоит из многовитковой обмотки, намотанной из медной шины в два слоя и замоноличенной при помощи эпоксидной смолы.

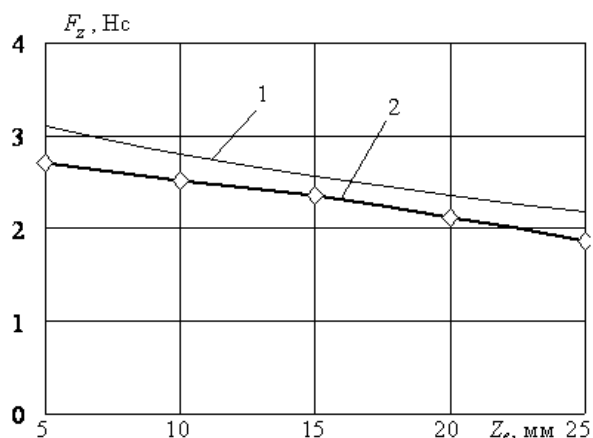


Рис. 4. Зависимости рассчитанных (1) и измеренных (2) значений импульса силы от величины рабочего хода якоря

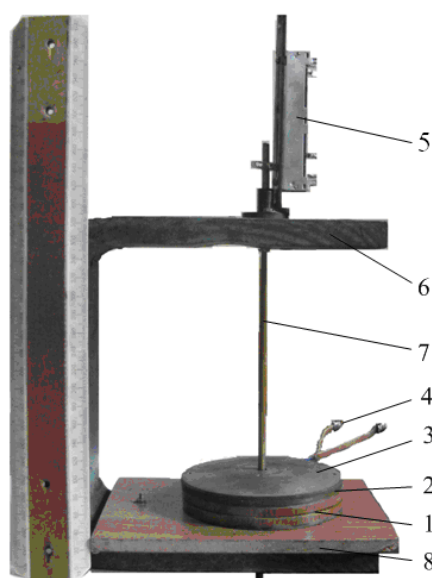
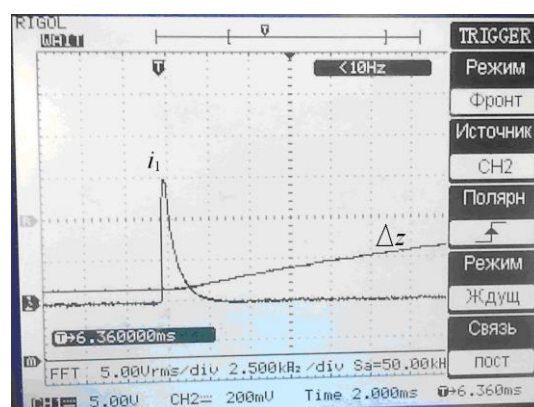


Рис. 5. Общий вид экспериментальной установки для исследования ЛЭПУД, работающего в качестве ускорителя

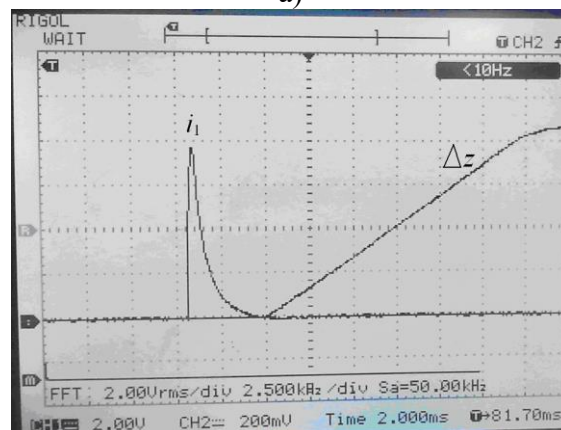
К якору 2 прикреплен стальной ударный диск 3. Индуктор посредством токовыводов 4 соединяется с ЕНЭ. Для измерения вертикальных перемещений используется резистивный датчик 5, закрепленный на С-образном каркасе 6. Между горизонтальными стенками каркаса 6 подвижно установлен направляющий стержень 7, проходящий через центральные отверстия индуктора и якоря. Индуктор установлен на неметаллическом основании 8 на нижней стенке каркаса, а на верхней стенке каркаса установлен резистивный датчик перемещений 5. К верхней стенке каркаса крепится демпферная пружина (на фото отсутствует). Направляющий

стержень соединен с ударным диском и подвижным контактом датчика перемещений, сигнал от которого подается на электронный осциллограф. Таким образом одновременно измеряются ток в индукторе  $i_1$  и перемещение якоря  $\Delta z$  (рис.6).

Перемещение якоря начинается с выдержкой времени по отношению к моменту возникновения токового импульса и носит практически линейный характер на начальном участке разгона. В последующем перемещение якоря при напряжении  $U_0=400$  В замедляется, что связано с взаимодействием его с демпферной пружиной. Установлено, что электрические показатели ЛЭПУД согласуются с расчетными с точностью до 4 %, а механические показатели – до 9 %.



а)



б)

Рис. 6. Осциллограммы тока индуктора  $i_1$  и перемещения якоря  $\Delta z$  при напряжении ЕНЭ  $U_0$ : 300 В (а) и 400 В (б)

Для уменьшения магнитных полей рассеяния используется ферромагнитный экран, выполненный с плоским основанием и наружной обечайкой [9]. Было установлено влияние экрана на скорость якоря. Если



экран выполняется массивным из стали, то индуцирующиеся в нем вихревые токи не пропускают магнитное поле и скорость якоря уменьшается (рис.7, а). При выполнении якоря из магнитоэлектрика с магнитными свойствами стали, указанные эффекты устраняются (рис.7, б).

Экспериментальный ферромагнитный экран был выполнен из стали с четырьмя радиальными разрезами и составным, что позволяло изменять высоту дискового основания  $H_{3a}$  и наружной обечайки  $H_{3b}$ . Экран описывается следующими геометрическими параметрами:

$$\chi = H_{3a} H_1^{-1}, \quad \varepsilon = H_{3b} H_1^{-1}.$$

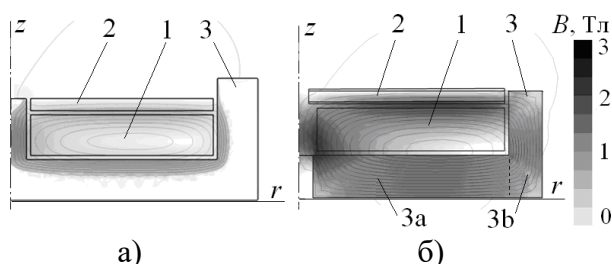


Рис.7. Распределение магнитного поля в момент максимума силы при использовании экрана, выполненного из стали (а) и магнитоэлектрика (б)

На основе теоретических и экспериментальных исследований были установлены геометрические параметры ферромагнитного экрана, при которых скорость якоря с ударным диском  $V_{ср}$  возрастает на 47 % (рис.8).

Было показано, что ферромагнитный экран уменьшает максимальную величину тока в индукторе  $i_{1m}$  на 6 % и время достижения током индуктора максимального значения на 8 %, но увеличивает длительность положительного полупериода тока индуктора до 30 %. Экспериментальные результаты с погрешностью до 6 % согласуются с результатами расчетов.

### Выводы

Таким образом, при проведении экспериментальных исследований ЛЭПУД целесообразно одновременно регистрировать быстротекающие электрические и механические процессы с использованием электронного осциллографа.

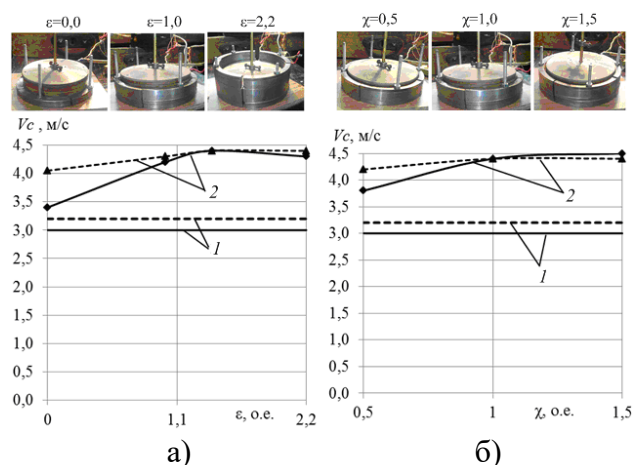


Рис. 8. Зависимости средней скорости якоря от параметра  $\varepsilon$  при  $\chi = 1$  (а) и от параметра  $\chi$  при  $\varepsilon = 1,4$  (б) ЛЭПУД: 1 – с ферромагнитным экраном; 2 – без экрана

Электрические процессы характеризуются импульсом тока в неподвижном индукторе.

При работе ЛЭПУД в качестве ускорителя необходимо контролировать характер перемещения якоря, например, с использованием датчика перемещений, а при работе в качестве ударно-силового устройства – величину силового воздействия на соответствующий объект, например, с использованием пьезоэлектрического датчика.

Установлено влияние ферромагнитного экрана на показатели ЛЭПУД. Указанный экран позволяет увеличить скорость якоря с ударным диском на 47 %.

### Список использованной литературы

1. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electro-mechanical / A. Bissal. – Stockholm, Sweden. – 2013. – 120 p.
2. Lim D.K. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method / D.K.Lim, D.K.Woo, I.W.Kim // IEEE transactions on magnetics. – 2013. – Vol. 49. – №12. – P. 5749 – 5755.
3. Bolyukh V.F. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter / V.F.Bolyukh, A.I.Vinnichenko // Measurement techniques. – 2014. – Vol. 56, № 10. – P. 1098-1104.
4. Bolyukh V.F. High-efficiency impact electromechanical converter / V.F.Bolyukh,

V.F. Luchuk, M.A.Rassokha, I.S.Shchukin // *Russian electrical engineering*. – 2011. – Vol. 82, № 2. – P. 104 -110.

5. Болюх В.Ф. Линейные индукционно-динамические преобразователи / В.Ф. Болюх, И.С.Щукин. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing. - 2014. – 496 с.

6. Подольцев А.Д. Мультифизическое моделирование в электротехнике / А.Д.Подольцев, И.Н.Кучерявая. – Киев. – 2015. – 280 с.

7. Shoubao L. Improvement of current filament method and its application in performance analysis of induction coil gun / L.Shoubao, R.Jiangjun, P.Ying // *IEEE transactions on plasma*. – 2011. – Vol. 39, №. 1. – P. 382 –389.

8. Болюх В.Ф. Экспериментальные исследования влияния параметров ферромагнитного сердечника на электромеханические показатели линейного индукционно-динамического преобразователя / В.Ф.Болюх, С.В.Олексенко, И.С.Щукин // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2014.- № 5. – С.13-18.

9. Bolyukh V.F. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter / V.F.Bolyukh , S.V.Oleksenko // *Russian electrical engineering*. – 2015. – Vol. 86, № 7. – P. 425-431.

Получено 11.04.2016

## References

1. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electro-mechanical. – *Stockholm, Sweden*. – 2013. – 120 p.

2. Lim D.K., Woo D.K., Kim I.W. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method // *IEEE transactions on magnetics*. – 2013. – Vol. 49. – №12. – P. 5749 – 5755.

3. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // *Measurement techniques*. – 2014. – Vol. 56, № 10. – P. 1098-1104.

4. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // *Russian electri-*

*cal engineering*. – 2011. – Vol. 82, № 2. – P. 104 -110.

5. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. Linear induction-dynamic converters. – *Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing*. - 2014. – 496 p. [in Russian].

6. Podol'tsev A.D., Kucheryavaya I.N. Multiphysical modeling in electrical engineering. – *Kiev*. – 2015. – 280 p. [in Russian].

7. Shoubao L., Jiangjun R., Ying P. Improvement of current filament method and its application in performance analysis of induction coil gun // *IEEE transactions on plasma*. – 2011. – Vol. 39, №. 1. – P. 382 –389.

8. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Experimental studies of the effect of the ferromagnetic core parameters on the electrical performance of the linear induction-dynamic converter // *Electrical engineering and electromechanics*. – 2014.- № 5. – С.13-18. [in Russian].

9. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter // *Russian electrical engineering*. – 2015. – Vol. 86, № 7. – P. 425-431.



Болюх  
Владимир Федорович,  
д-р техн. наук,  
проф. каф. "Общая электротехника" НТУ «ХПИ»,  
т. (057) 70-76-427,  
e-mail: vfbolyukh@gmail.com



Олексенко  
Сергей Владимирович,  
Аспирант каф. «Общая электротехника» НТУ «ХПИ»  
т. (057) 70-76-427,  
e-mail:  
oleksenko\_serega@mail.ru



Щукин  
Игорь Сергеевич,  
канд. техн. наук, доцент  
кафедры «Электрические машины» НТУ «ХПИ»  
т. (057) 714-09-43  
e-mail: dir.60@mail.ru